

Санкт-Петербургский государственный университет

Физический факультет

Кафедра радиофизики



Эмпирическая модель регулярного поглощения КВ радиоволн в средних широтах

Выпускная квалификационная работа

Студента дневного отделения

_____ **Шеховцова Федора Викторовича**

Научный руководитель:
_____ ст. научный сотрудник, PhD **Заалов Н.Ю.**

Рецензент:
_____ к.ф.-м.н., **Миронова Ирина Александровна**

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Поглощение коротких радиоволн в ионосфере | 4 |
| 1.1 Теория поглощения | 4 |
| 1.2 Существующие эмпирические модели поглощения радиоволн | 7 |
| 1.3 О методах современного моделирования ионосферы | 9 |
| Глава 2. Построение модели регулярного поглощения | 11 |
| 2.1 Практические данные | 11 |
| 2.2 Расчёт поглощения коротких радиоволн | 15 |
| Глава 3. Полученные результаты | 17 |
| Список литературы | 31 |

Введение

Короткие радиоволны диапазона 1-10МГц имеют свойство отражаться от ионосферы. Благодаря этому свойству и возможна передача таких радиоволн на дальние расстояния и в отличие от волн другого диапазона для их распространения не требуется наличия дополнительных устройств на всем пути следования луча.

Амплитуда радиоволны определяется двумя факторами – его модовой структурой и поглощением. Основное неотклоняющее поглощение происходит в слое D, который радиоволна проходит без отражения, но в котором теряет часть своей энергии. В слоях E и F так же происходит поглощение, но именно в этих слоях происходит отражение. От какого именно слоя отразиться радиоволна зависит от её частоты и времени суток. Кроме того, неотъемлемой частью распространения радиоволн является их поглощение за счет ультрафиолетового излучения Солнца, что приводит к уменьшению диапазона частот, способных к отражению от ионосферы. Этот диапазон в среднем меняется от 1-2МГц до 6-12МГц. Описанный тип поглощения называется регулярным.

Современный уровень развития радиосвязи и геофизики требует качественного моделирования ионосферы и распространения радиоволн, для проведения точных расчётов. Такое моделирование невозможно без использования формул, которые бы описывали эффекты, связанные с процессами, происходящими в ионосфере. Многие формулы, которые позволяют рассчитать коэффициент поглощения коротких радиоволн в ионосфере, используемые при моделировании распространения радиоволн, недостаточно хорошо применимы в определенных условиях, а так же вносят существенные погрешности.

Целью работы является оптимизация модели поглощения коротких радиоволн, основанной на простой эмпирической формуле, которая бы описывала зависимость интенсивности поглощения ионосферой энергии радиоволны от ультрафиолетового излучения Солнца и при этом не требовала бы сложных вычислений. При правильном построении модели поглощения коротких радиоволн, расчётные ионограммы должны максимально точно совпадать с экспериментальными. В таком случае можно утверждать, что полученную формулу можно применять для расчёта регулярного поглощения коротких радиоволн в средних широтах.

Глава 1. Поглощение коротких радиоволн в ионосфере

1.1 Теория поглощения

Ионосферой называют ионизованную область атмосферы, расположенную выше 50 – 60 км. Верхней границей ионосферы является внешняя часть магнитосферы Земли. Ионосфера представляет собой природное образование разреженной слабоионизованной плазмы (ионизованный квазинейтральный газ, состоящий из свободных электронов и ионов), находящейся в магнитном поле Земли и подвергающейся воздействию ионизирующего излучения Солнца. Электронная концентрация – отношение числа электронов к единице объема, в ионосфере распределена неравномерно, имеются слои, где концентрация достигает локальных максимумов. Они обозначаются буквами D, E и F. Слой F в летнее время разделяется на F_1 и F_2 слои. На рисунке 1 показано, как устроены эти слои [1]. Вертикальные и горизонтальные стрелки характеризуют пределы изменения электронной концентрации и высоты слоя F_2 . Также вертикальными стрелками указаны основные факторы ионизации слоёв D, E и F. L_α и L_β – линии серии Лаймана из спектра водорода.

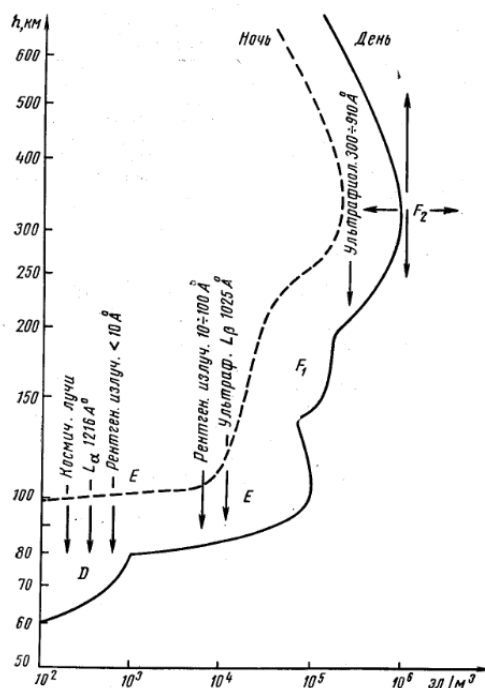


Рис. 1 Распределение электронной концентрации по высоте днём и ночью

Волны той или иной частоты отражаются от разных слоёв ионосферы и соответственно проходят различные расстояния. На рисунке 2 изображена схема отражения коротких волн в ионосфере [2].

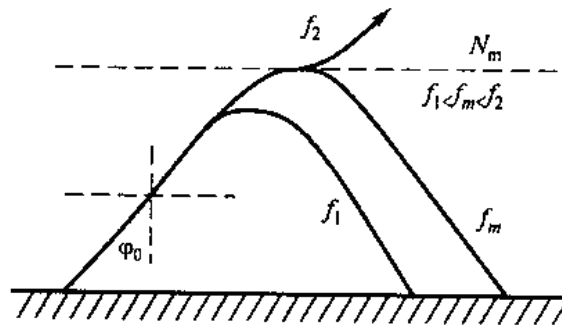


Рис. 2 Отражение радиоволн различных частот при одинаковом угле падения ($\varphi_0 = \text{const}$)

Для успешной передачи необходимо выполнение двух условий: 1) энергия волны должна быть достаточно большой, чтобы полностью не поглотиться в слоях E и D, причем поглощение уменьшается с ростом частоты; 2) частота излучения должна быть меньше максимального значения, отражаемого слоем при данном угле падения. В итоге, получается, что частота ограничена сверху и снизу, и значения верхней и нижней границ частот изменяются в зависимости от времени суток, широты, сезона, солнечного цикла и прочих условий.

Радиоволны КВ диапазона при попадании в ионосферу отражаются от нее или же проходят насквозь, при этом амплитуда этих волн уменьшается. Происходит это за счёт смещения электронов и ионов в ионосфере под действием электрического вектора волны. Вследствие этого, энергия, излучённая заряженными частицами после отражения, будет меньше, чем энергия падающей волны. Таким образом, среда частично поглощает радиоволну. Именно поглощение и представляет серьезный научный интерес, так как, значительно влияет на распространение радиоволн.

Перед тем, как приступить к описанию теории поглощения, перечислим основные параметры ионосферы и дадим их определение. Плазменная частота – частота собственных продольных колебаний заряда в плазме в отсутствии магнитного поля. Гирочастота – угловая частота, с которой заряженная частица вращается вокруг силовой линии магнитного поля. Эффективная частота столкновений – есть обратная величина времени свободного пробега электрона, то есть времени, за которое электрон не столкнется с другими частицами.

Первая теория ионосферного поглощения была независимо разработана Лассеном, Эпплтоном и Хартри в 1920-1930 гг. Формулы, которые сегодня известны как формулы Эпплтона-Хартри (Эпплтона-Лассена) показывают сложную зависимость показателя преломления от плазменной частоты, гирочастоты, эффективной частоты столкновений электронов с тяжелыми частицами и частоты падающей волны [3].

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{\frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta}{1-X-iZ} \pm \frac{1}{1-X-iZ} \left(\frac{1}{4}Y^4 \sin^4 \theta + Y^2 \cos^2 \theta (1-X-iZ)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

где, $X = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$, $Y = \frac{\omega_H}{\omega}$, $Z = \frac{\nu_{ef}}{\omega}$, ν_{ef} – эффективная частота столкновений, ω – рабочая радиальная частота волны, $\omega_0 = \sqrt{\frac{N_e * e^2}{\epsilon_0 * m}}$, $\omega_H = \frac{B_0 |e|}{m}$ – электронная гирочастота, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, B_0 – напряженность магнитного поля в ионосфере, e – заряд электрона, m – масса электрона, θ – угол между направлением магнитного поля и направлением распространения волны, N_e – электронная концентрация. Для теоретических расчётов отражения и преломления в ионосфере эта формула незаменима.

С начала 1940-х годов, изучение ионосферного поглощения получило широкое распространение. Многие ученые анализировали зависимости интенсивности поглощения от частоты сигнала, структуры ионосферы и её динамики. Были предложены многочисленные эмпирические модели, в которых имелся ряд сложностей таких, например как ограниченная область применения, ограниченный набор данных и, как следствие, неточность.

Однако существуют строгие неэмпирические формулы, которые позволяют рассчитывать амплитуду поглощения. Они имеют гораздо более широкие области применения и гораздо более точны. Вот одна из таких формул, основанная на уравнениях Эпплтона-Хартри в квазипродольном приближении [4]:

$$Absorption \sim \int \frac{N_e \nu_{ef}}{\nu_{ef}^2 + (\omega \pm \omega_H \cos \theta)^2} dl \quad (2)$$

где, N_e – электронная концентрация, ν_{ef} – эффективная частота столкновений, ω – рабочая частота, ω_H – электронная гирочастота, θ – угол между магнитным полем и направлением распространения волны. Интегрирование ведется по всей длине луча. Знак “+” характеризует левую круговую поляризацию и обыкновенную моду, а знак “–” правую круговую поляризацию и необыкновенную моду.

Вот аналог этой же формулы, но уже с определенным коэффициентом [5].

$$L(f_\nu) = 2.33 * 10^{-15} \int \frac{N_e \nu_{ef}}{\mu} * \frac{dh}{(f_\nu + f_l)^2} (dB) \quad (3)$$

где, μ – показатель преломления, f_l – электронная гирочастота, взятая относительно компоненты земного магнитного поля вдоль направления распространения с положительным значением. Измеряется в децибелах.

Видно, что значение поглощения прямо пропорционально произведению $N_e v_{ef}$. На рисунке 3 показано, что большая часть неотклоняющего поглощения происходит в области D, так как максимум произведения $N_e v_{ef}$ достигается на высоте 90 км [6]. Высота этого максимума может варьироваться в зависимости от времени суток и геофизических условий. Важно понимать, что в отличие от слоя D, в слоях E и F происходит поглощение с отклонением, вследствие отражения и преломления.

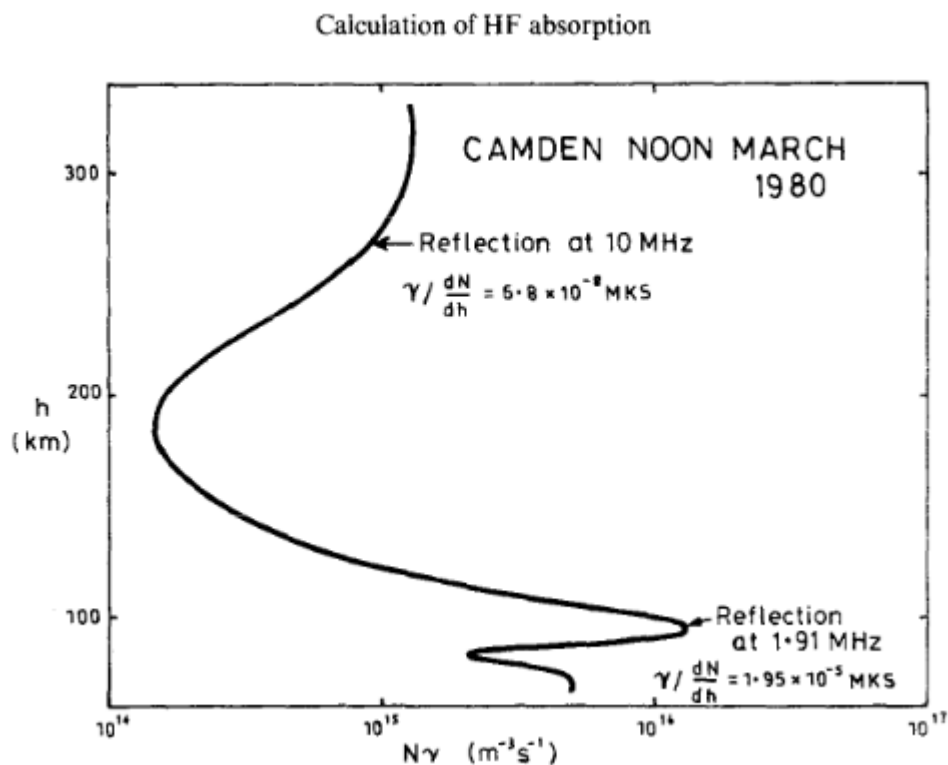


Рис. 3 Изменения с высотой произведения электронной концентрации и частоты соударений Nv .

Применение всех этих формул очень трудоемкая работа, так как интегрирование ведется по всей длине луча. Кроме того, для вычислений необходимо знать электронную плотность N_e и эффективную частоту столкновений v_{ef} на всем пути следования луча. На практике же часто эти значения не известны. Если, например, произошла солнечная вспышка и значения плотности и частоты столкновений плохо определены, очень сложно вести расчеты по этим формулам. Поэтому получение простых эмпирических формул, которые бы не требовали громоздких расчетов, но в тоже время обладали значительной точностью, представляет интерес.

1.2 Существующие эмпирические модели поглощения радиоволн

Начиная с 1950х годов, было предложено множество эмпирических формул, описывающих величины поглощения при вертикальном падении волны на ионосферу.

Использование именно вертикального падения необходимо, так как при распространении на трассах даже не очень большой протяженности, полученные значения поглощения различаются при использовании разных антенн [7]. В своей работе, Прушкин и Флигель привели несколько формул, полученных с помощью следующих методов расчёта напряжённостей поля: The Central Radio Propagation Laboratory (CRPL), Лейтинена-Хайдона (LH) и А.Н. Казанцева (АНК).

$$L^{CRPL} = \frac{500(1 + 0.005R)(0.142 + 0.858\cos\chi)I}{(f + f_L)^2} \quad (4)$$

где f – рабочая частота, f_L – продольная составляющая гирочастоты, R –число солнечных пятен, χ – зенитный угол солнца, I – сезонный фактор.

$$L^{LH} = \frac{615.5(1 + 0.0037R)(\cos 0.881\chi)^{1/3}I}{(f + f_L)^{1.98}} \quad (5)$$

Метод АНК предполагает две формулы поглощения при отражении от области F2. И одну формулу при отражении от слоя E. Для $f < 5\text{МГц}$ и отражения от слоя E

$$L^{АНК} = \frac{3.48(f_0E)^2}{f} + \frac{34.8f}{f_0E} \quad (6)$$

где f_0E – критическая частота слоя E. При отражении от слоя F2 и $f < 5\text{МГц}$

$$L^{АНК} = \frac{3.48(f_0E)^2}{f} + \frac{25.2(f_0E)^2}{(f + f_L)^2} + 0.174f^2 \quad (7)$$

А для $f \geq 5\text{МГц}$ при отражении от области F2

$$L^{АНК} = \frac{51.3(f_0E)^2}{(f + f_L)^2} + 0.174f^2 \quad (8)$$

Эти формулы имеют ограничение – рабочая частота должна быть не менее чем $0,1f_{кр.}$, где $f_{кр.}$ – критическая частота (минимальная частота, на которой происходит отражение).

Кроме того, для описания амплитуды поглощения в зависимости от зенитного угла солнца и солнечной активности, которая описывается числом Ssn (Sunspotnumber), характеризующим число солнечных пятен существует формула, предложенная Равером несколько ранее [8]:

$$A_{uv} = \frac{430 * (1 + 0.0035 * Ssn) * \cos(\chi)^{0.75} \sec \Phi_D}{(f_{op} \pm f_l)^2} (dB) \quad (9)$$

где χ – зенитный угол солнца, f_{op} – рабочая частота, f_l – продольная составляющая гирочастоты, Φ_D – угол между направлением луча и нормалью к поверхности земли. При вертикальном распространении величина $\sec \Phi_D = 1$.

Последующие исследования показали, что численный коэффициент во всех этих формулах зависит не только от сезона, но так же и от координаты. Была предложена карта, на которой показаны значения этого коэффициента в зависимости от сезона и широты[5]. Также было выявлено, что при расчёте на частотах 1-3 МГц, поглощение получается завышенным. Для устранения этого недостатка, была предложена следующая формула [5].

$$L_a = \frac{(7 + 0.019D)(1 + 0.015Ssn)}{f_{ob}^2 + 10} \quad (10)$$

где f_{ob} - частота сигнала в МГц, а D – расстояние, на которое передаётся сигнал в км. Наличие в знаменателе данной формулы слагаемого $\nu = 10$ значительно снижает поглощение на частотах порядка 1-3 МГц.

Все эти формулы имеют в качестве переменных рабочие и гирочастоты, число солнечных пятен, зенитный угол солнца χ и сезонный фактор. В данных формулах прослеживается зависимость амплитуды поглощения от $\cos^n \chi$. Значения показателя n для каждой из формул различные. Кроме того, каждая из формул даёт наиболее точные результаты на определённом диапазоне частот, а в тоже время на других диапазонах применение этой же формулы приводит к неточностям в расчетах. Именно поэтому представляет интерес получение формулы, которая имела бы гораздо более широкую область применения, а также наименьшую погрешность. Из всего вышеописанного в этом разделе можно сделать вывод, что для получения такой формулы, имеет смысл варьировать сезонный параметр, а так же параметр ν .

1.3 О методах современного моделирования ионосферы

Методы моделирования ионосферы активно разрабатывались, начиная еще с конца 1940-х годов. Одним из первых методов является CRPL [9]. Его суть заключается в следующем. Сначала для каждой станции строится точки на графике, где по оси абсцисс откладывается число солнечных пятен, а по оси ординат критическая частота f_0F2 . Затем выбирается среднемесячное значение и среднегодовое значение числа солнечных пятен и снова строится зависимость числа солнечных пятен от критической частоты f_0F2 . Эти точки соединяются прямой. Точки среднегодового числа солнечных пятен отклоняются от прямой меньше, чем среднемесячного, поэтому при построении им отдается больший вес. Впоследствии, проводится дальнейшая аппроксимация и определение критических частот. Более подробно этот метод описан в вышеуказанной статье.

Вполне естественно, что с развитием технологий появляются все более точные и качественные модели ионосферы. Одной из таких моделей является IRI (International

Reference Ionosphere). IRI – международный проект, спонсируемый Комитетом по космическим исследованиям (COSPAR) и Международным союзом радио индустрии (URSI). Эти организации сформировали рабочую группу в конце 60-х годов для создания эмпирической стандартной модели ионосферы на основе всех доступных источников данных. Выпущено несколько улучшенных версий модели. Для данного местоположения, времени и даты IRI дает среднемесячные значения электронной плотности, температуры электронов, ионной температуры и состава ионов в диапазоне высот от 50 км до 2000 км. Кроме того, параметры IRI включают в себя полное электронное содержание (TEC).

Основными источниками данных о состоянии ионосферы являются всемирная сеть ионозондов, мощные некогерентные радары рассеяния, звуковые зонды верхней поверхности и инструменты на местности, на нескольких спутниках и ракетах. Эти данные обрабатываются в специальном программном пакете, который включает в себя подпрограммы Fortran, модельные коэффициенты (CCIR и URSI) и файлы документации.

Глава 2. Построение модели регулярного поглощения

В данной работе, исследуется зависимость амплитуды поглощения радиоволн от ультрафиолетового излучения Солнца и зенитного угла. Для теоретического моделирования распространения радиоволн применяется пакет NIM-RT [10], который включает в себя программы для Matlab и Fortran. Данный пакет позволяет рассчитывать 3D лучевые траектории в присутствии магнитного поля Земли. Моделирование проводится в приближении геометрической оптики (ГО) [11]. У данного метода есть два основных ограничения:

1. Параметры среды распространения должны слабо изменяться в масштабах длины волны;
2. Пространственный масштаб неоднородностей должен быть достаточно велик по сравнению с главной зоной Френеля.

Процессы, происходящие в ионосфере средних широт, удовлетворяют этим условия, что делает использование метода ГО возможным.

Целью работы являлось построение такой модели распространения радиоволн, которая была бы максимально приближена к реальной картине.

2.1 Практические данные

Для построения модели, на основании которой можно было бы получить эмпирическую зависимость амплитуды поглощения от активности Солнца, в первую очередь требовалось выбрать соответствующие дни для исследования. Рентгеновское излучение и высыпания протонов оказывают серьезное влияние на поглощение, так как невозможно будет оценить вклад именно ультрафиолетового излучения на фоне общей картины поглощения. Поэтому для исследования необходимо было отобрать дни, в которые рентгеновское излучение было очень слабым, а уровень высыпания протонов – низким. Отбор производился при помощи программы, включенной в пакет NIM-RT.

Входными данными для этой программы является файл, внутри которого содержатся данные об уровне рентгеновского излучения и высыпания протонов в выбранном промежутке времени, полученные со спутников GOES (<http://satdat.ngdc.noaa/sem/goes/>). Программа дает возможность строить две диаграммы, по которым и определяется, в какие дни наблюдается наименьшее влияние рентгеновского излучения и высыпания протонов.

В данной работе, дни выбирались таким образом, чтобы значения потока рентгеновского излучения были ниже $10^{-6} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, а потока протонов ниже $10^2 \frac{P}{\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}}$ (р –

число протонов, ср – стерадиан), так как по результатам исследований [12], в этом случае рентгеновское излучение и поток протонов не оказывают существенного влияния на поглощение радиоволн.

Ниже представлен пример этих диаграмм (Рис.4). Верхняя диаграмма рисунка иллюстрирует поток рентгеновских частиц, а нижняя – интеграл энергетического потока протонов.

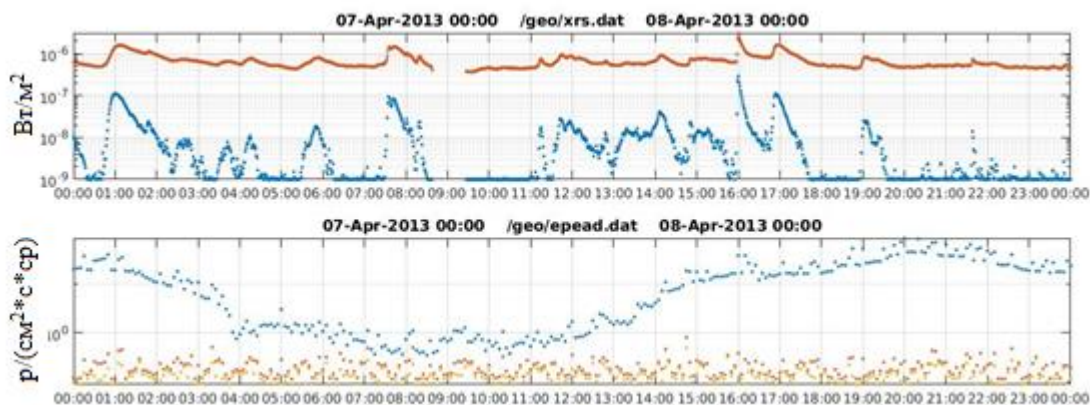


Рис. 4 GOES-15 наблюдения за потоком рентгеновских лучей и интегральным потоком протонов 7-8 Апреля 2013 года (<http://satdat.ngdc.noaa/sem/goes/>)

Вторым этапом отбора дней для исследования, был визуальный осмотр ионограмм вертикального зондирования. Ионограммы были взяты с сайта (<http://ulcar.uml.edu/DIDBase>), который предоставляет данные о распространении радиоволн со всех ионозондов, подключенных к этой сети. Для исследования желательно, чтобы на ионограмме присутствовало минимум два (лучше более) скачков радиоволны, а также отсутствовало Es. Подробное описание Es и его природы, а так же проблемы расчета, связанные с ним опускается, так как оно не представляет интереса в этой работе. Ниже приведены примеры ионограмм, на которых присутствует и отсутствует Es (Рис. 5 и Рис. 6). Ионограмма от 2013.04.07 (Рис.6) полностью удовлетворяет нашим условиям. На ней явно наблюдается многоскачковое отражение радиоволны, а так же отсутствие Es.

Когда соответствующие дни были подобраны, потребовались данные о распространении радиоволн. Данные были получены при помощи программы SAO Explorer. Данная программа позволяет скачивать ионограммы с сайта (<http://umlcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html>). В этих ионограммах, в отличие от ионограмм, полученных с сайта <http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>, отображается энергия волн в Децибелах, которая необходима для расчета амплитуд поглощения. Вдобавок, ионограммы, построенные на сайте <http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>, профильтрованы от помех, без учёта влияния автоматической регулировки усиления (APУ). АРУ усиливает сигналы на всем диапазоне частот, в результате чего амплитуды сигналов получаются завышенными. Что

бы этого избежать, на этом этапе исследования необходимо использовать данные, полученные с SAO Explorer, где значения амплитуд в области, не содержащей треки, и характеризуют коэффициент усиления АРУ, который нам необходимо исключить, что позволяет выполнить пакет NIM-RT. Ниже представлены примеры ионограмм до и после исключения влияния АРУ (Рис. 7 и 8).

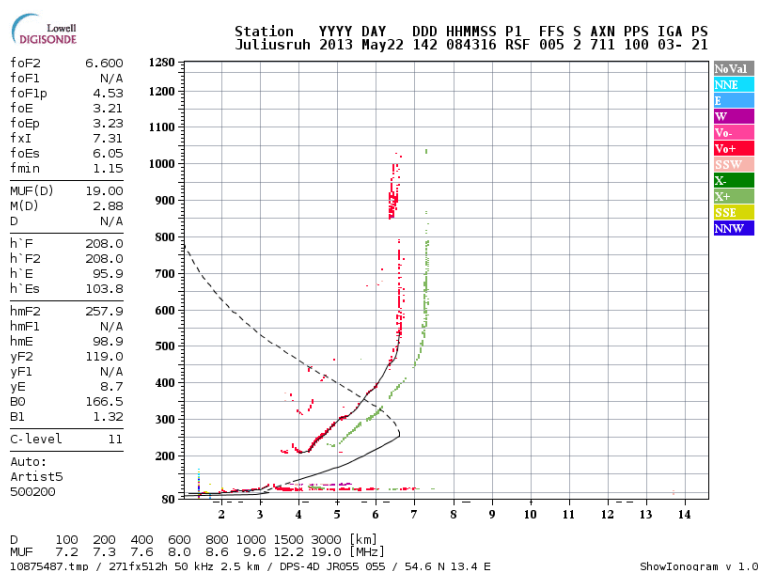


Рис. 5 Пример ионограммы с Es. 22 Мая 2013 года 08:43, станция Juliusruh (JR055)
[https://lgdc.uml.edu/common/ShowIonogramPage?mid=15141008&ursiCode=JR055&time=2013.05.22%20\(142\)%2008:43:16.000](https://lgdc.uml.edu/common/ShowIonogramPage?mid=15141008&ursiCode=JR055&time=2013.05.22%20(142)%2008:43:16.000)

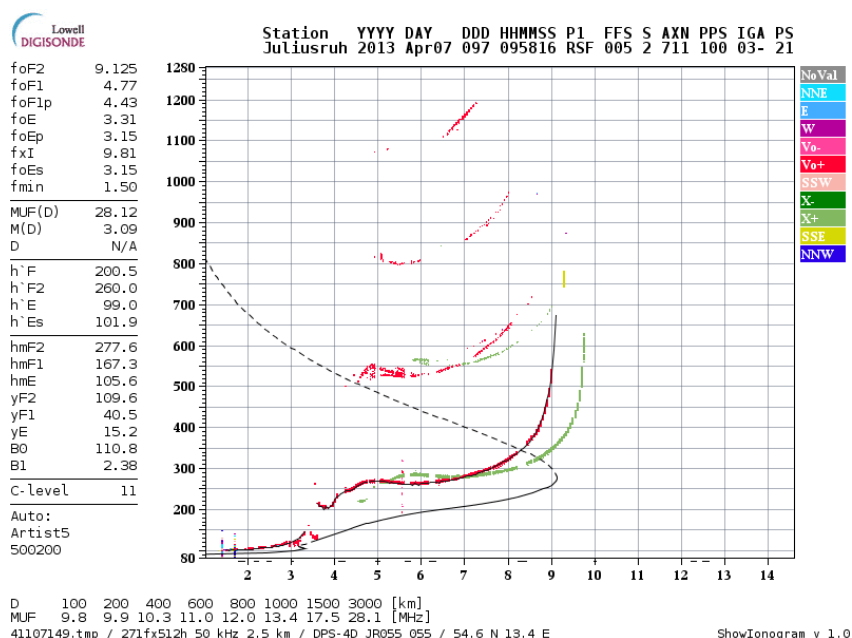


Рис. 6 Пример ионограммы, удовлетворяющей нашим критериям. 7 Апреля 2013 года
 09:58, станция Juliusruh (JR055)
[https://lgdc.uml.edu/common/ShowIonogramPage?mid=14917379&ursiCode=JR055&time=2013.04.07%20\(097\)%2009:58:16.000](https://lgdc.uml.edu/common/ShowIonogramPage?mid=14917379&ursiCode=JR055&time=2013.04.07%20(097)%2009:58:16.000)

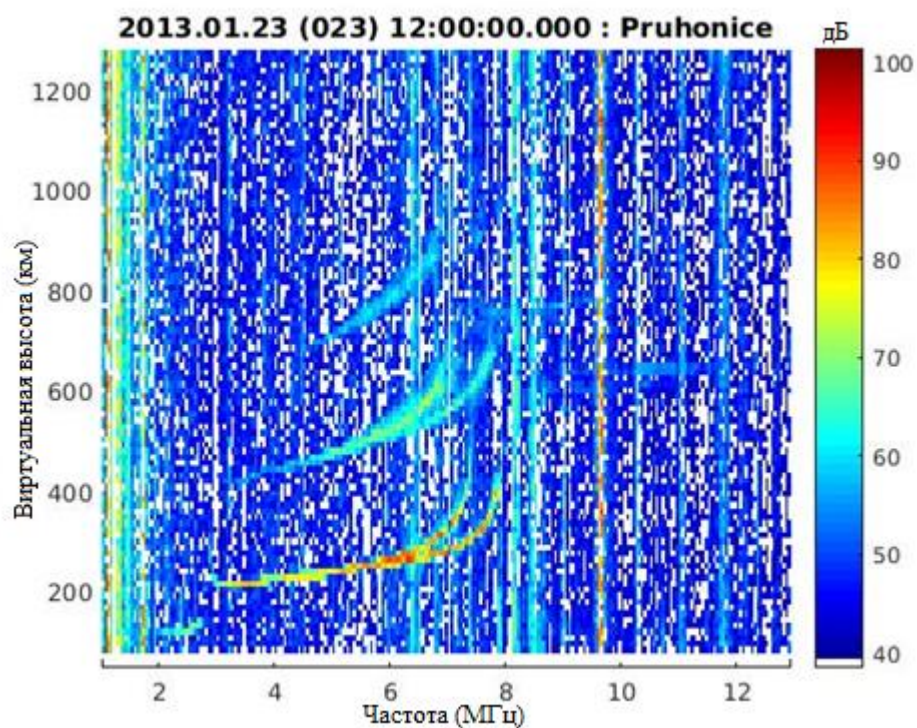


Рис. 7 Пример ионограммы, построенной с использованием данных SAO.

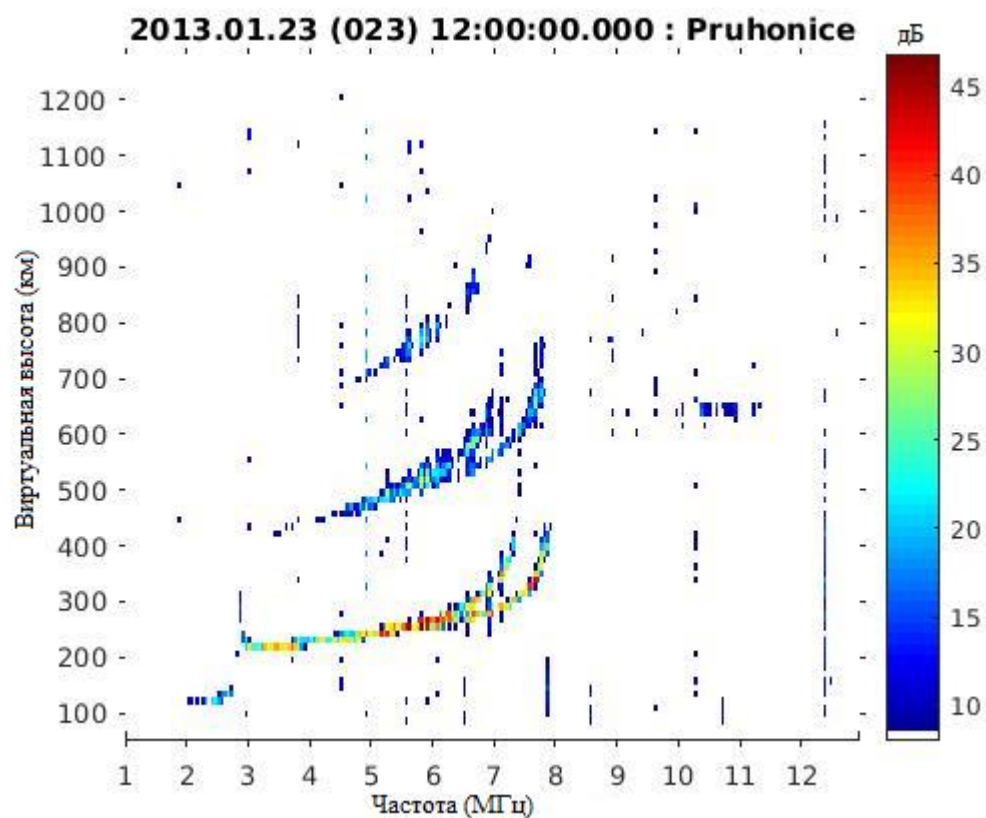


Рис. 8 Пример ионограммы, с исключённым влиянием АРУ

На этом анализ практических данных завершён. Были получены данные следующих дней: 23.01.2013, 07.04.2013, 16.06.2013, 2013.10.19, 01.06.2012, 02.04.2012,

11.06.2012, 01.08.2012, 04.10.2012. Дни были специально подобраны таким образом, чтобы проследить сезонную зависимость, а так же сравнить результаты за 2 года.

2.2 Расчёт поглощения коротких радиоволн

Построение модели ионосферы производится при помощи пакета NIM-RT в три основных этапа:

1. Моделирование ионосферы
2. Расчёт 3D лучевых траекторий распространения радиоволн
3. Расчёт поглощения радиоволн и обработка полученных данных

Разделение на несколько этапов даёт много возможностей для исследований, так как позволяет вносить изменения в расчёте поглощения, не пересчитывая при этом заново траектории распространения радиоволн. Это стало возможно благодаря появлению современной вычислительной техники.

В первую очередь необходимо подготовить профиль ионосферы. Производится это при помощи программы пакета NIM-RT. Данная программа использует данные с реально существующих станций вертикального зондирования ионосферы, полученные с сайта Виртуальной ионосферной термосферной мезосферной обсерватории (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html). Из этих данных формируется файл, содержащий основные параметры ионосферы, используя который программа строит профиль ионосферы. После того, как профиль сформирован, можно перейти к построению 3D лучевых траекторий.

Существует множество программ, позволяющих рассчитывать лучевые траектории в трехмерно неоднородной слоистой среде, в данной работе использовалась программа, написанная Джоунсом и Стефенсоном [13]. Данная программа, позволяет вычислить групповой и фазовый путь, доплеровский сдвиг частоты и геометрическую длину пути для каждого луча. В этой программе используется численное интегрирование уравнений Гамильтона-Якоби. Вручную задается положение передатчика, частоты радиоволны, направление излучения, высота приемника и электронная плотность среды. Рефракционный индекс вычисляется по формуле Эпплтона-Хартри.

Данная программа впоследствии была модифицирована [10] и в неё был добавлен цикл по времени и частоте, что позволило рассчитывать временную и частотную зависимость амплитуды сигнала, а так же данные для построения ионограмм наклонного зондирования. Для того чтобы рассчитать траектории и амплитуды сигналов, необходим входной файл, имеющий строго определенную структуру и множество параметров. Этот файл является результатом работы программы пакета NIM-RT для среды MatLab.

Для того, что бы достичь поставленной цели, а именно получение формулы, описывающей регулярное поглощение в ионосфере средних широтах, используется программа пакета NIM-RT для MaLlab, работа которой заключается в том, что она преобразует ионограмму. Преобразование заключается в расчёте амплитуд каждого трека, а также снижении амплитуды сигнала в каждой точке на величину, определяемую формулой для расчёта поглощения. За основу была взята формула, полученная Равером [8].

$$A_{uv} = \frac{I_0 * (1 + 0.0035 * Ssn) * \cos(\chi)^{0.75}}{(f_{op} \pm f_l)^2} (dB) \quad (11)$$

В данной формуле коэффициент $I_0 = 430$. В пакете NIM-RT в этой формуле присутствует также сезонный множитель S [7].

$$A_{uv} = \frac{I_0 * S * (1 + 0.0035 * Ssn) * \cos(\chi)^{0.75}}{(f_{op} \pm f_l)^2} (dB) \quad (12)$$

S принимает следующие значения: в период с мая по август $S=1$, в период с ноября по февраль $S = 1.3$, а в сентябре, октябре, марте и апреле $S = 1.15$. Программа вычисляет поглощение именно по этой формуле.

Была проведена серия расчётов, с целью получить предварительные результаты и увидеть, какие модификации необходимо произвести в этой формуле. Результаты расчётов сравнивались с экспериментальными данными, полученными с ионозондов Pruhonice (PR052), Fairford (FF051) и Juliusruh (JR051). Указанные ионозонды расположены по следующим координатам: Pruhonice – 50.0° северной широты, 14.6° восточной долготы; Juliusruh – 54.6° северной широты, 13.4° восточной долготы; Fairford – 51.7° северной широты, 1.5° западной долготы. Станции специально были подобраны на практически одинаковых широтах, так как при нашем предположении, коэффициент I_0 не должен меняться на одной широте, а так же в течение дня. В процессе исследования коэффициент I_0 варьируется, для того что бы добиться совпадения левой границы f_0 каждого трека теоретической ионограммы с практической. Однако, при наличии четырёх скачков добиться такого совпадения не всегда представляется возможным. В таких случаях значение I_0 подбирается таким образом, что бы суммарная разность между минимальными наблюдаемыми частотами f_0 для каждого трека экспериментальных и теоретических ионограмм была минимальной.

Глава 3. Полученные результаты

Работа над модификацией формулы поглощения началась с подбора коэффициента I_0 для проверки сезонной зависимости. Происходило это следующим образом. В формулу, по которой программа считает поглощение, вручную вносились значения коэффициента I_0 , после чего программа заново строила ионограмму. Затем снимались значения наименьшей наблюдаемой частоты f_0 для каждого скачка. Полученные результаты заносились в таблицу, что бы впоследствии сравнивать результаты. Ниже представлен пример такой таблицы.

| PQ052 2012.06.11 9:00 UT | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------------|----------------------|------|------|------|------|------|
| Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | Измеренная ионограмма | Расчётные ионограммы | | | | | |
| Первого скачка в F слое | 5,75 | 5,80 | 5,80 | 5,80 | 5,80 | 5,80 | 5,80 |
| Второго скачка в F слое | 6,15 | 5,80 | 5,94 | 6,07 | 6,07 | 6,20 | 6,34 |
| Коэффициент I_0 | - | 340 | 370 | 400 | 430 | 460 | 480 |

Таблица 1 Минимальные наблюдаемые частоты при различном значении I_0

Видно, что при значении $I_0 = 430$ и $I_0 = 460$ достигается наибольшее совпадение с экспериментальной ионограммой, значит, искомое значение I_0 находится в диапазоне от 430 до 460. Аналогично проводились вычисления для всех остальных ионограмм в исследуемое время.

Полученные результаты не удовлетворяли ожиданиям, так как для одного и того же дня и разных станций, совпадение значений f_0 достигалось при разных значениях I_0 . Основные несовпадения наблюдались при значениях f_0 от одного до трёх мегагерц, в то время как несовпадения на более высоких частотах были не такими значительными. Такое расхождение на частотах порядка одного-трёх мегагерц связано с сильным увеличением значения дроби за счёт малого значения знаменателя в формуле (12). Поэтому в формулу (12) был добавлен коэффициент ν , который можно варьировать. Идея подставить ν взята из доклада CCIR [5]. После изменений от данного сезонного коэффициента S и I_0 пришлось отказаться, так как при таких параметрах зависимость уже будет иной. Теперь, формула для поглощения, в которой исследуемыми коэффициентами являются ν и I_1 выглядела следующим образом.

$$A_{uv} = \frac{I_1 * (1 + 0.0035 * Ssn) * \cos(\chi)^{0.75}}{(f_{op} \pm f_l)^2 + \nu} (dB) \quad (13)$$

Наличие данного коэффициента в знаменателе снизит поглощение, оказываемое на низких частотах, что должно привести более точному расчёту значений f_0 . Были проведены серии вычислений, в процессе которых варьировались коэффициенты ν и I_1 . По результатам исследований наилучший результат был получен при значении $\nu = 10$, как и в работе [5]. Значения I_1 в зависимости от сезона принимали следующие значения в 2013 году. Январь – $I_1 = 430$, Апрель – $I_1 = 250$, Июнь – $I_1 = 430$, Октябрь – $I_1 = 330$. Результаты представлены ниже на рисунках 9, 10, 11 и 12. Каждый из рисунков состоит из трёх строк и трёх столбцов. Данные ионозондов представлены в левом столбце. Ионограммы, построенные по зависимости, включённой в пакет NIM-RT, представлены в среднем столбце. Ионограммы, построенные после модификации формулы поглощения, представлены в третьем столбце. Не смотря на то, что пакет NIM-RT позволяет рассчитывать обыкновенную и необыкновенную магнито-ионную компоненту радиоволны, для удобства восприятия на расчётных ионограммах представлены только скачки обыкновенных радиоволн. Также приведены таблицы с указанием минимальных наблюдаемых частот для каждого скачка на экспериментальных и модельных ионограммах.

На ионограмме, записанной в Fairford (Рис.9 столбец (а) строка 1), наблюдается три скачка в слое F и один скачок в слое E. Но на расчётной ионограмме (Рис.9 столбец (б) строка 1) помимо трёх скачков в F слое и скачка в E слое наблюдается и четвёртый скачок в F слое. А в ионограмме с модифицированной зависимостью (Рис. 9 столбец (в) строка 1), как и в экспериментальной (Рис.9 столбец (а) строка 1), наблюдается точно три скачка в F слое.

На ионограмме, записанной в Juliusruh (Рис.9 столбец (а) строка 2), также наблюдаются три скачка в F слое и один скачок в слое E. На расчётной же ионограмме (Рис.9 столбец (б) строка 2) наблюдается четыре скача в F слое и один скачок в E слое. На ионограмме с модифицированной зависимостью (Рис.9 столбец (в) строка 2) можно видеть три скачка в слое F и один скачок в слое E, как и на записанной в Juliusruh (Рис.9 столбец (а) строка 2). Кроме того, наименьшая наблюдаемая частота f_0 третьего скачка ионограммы с модифицированной зависимостью больше подходит к экспериментальной ионограмме (Рис.9 столбец (а) строка 2).

Ионограмма, записанная в Pruhonice (Рис.9 столбец (а) строка 3), иллюстрирует наличие трёх скачков в F слое и один скачок в E слое. Расчётная ионограмма (Рис.9

столбец (б) строка 3) иллюстрирует четыре скачка в слое F. А на ионограмме с модифицированной зависимостью (Рис.9 столбец (в) строка 3), как и на экспериментальной (Рис.9 столбец (а) строка 3), наблюдается три скачка в слое F.

В таблицах 2, 3 и 4 также представлены численные результаты минимальных наблюдаемых частот на ионограммах от 2013.01.23 12:00 по Гринвичу. Минимальная наблюдаемая частота первого скачка в слое E не менялась в процессе варьирования параметров, поэтому её в таблице нет.

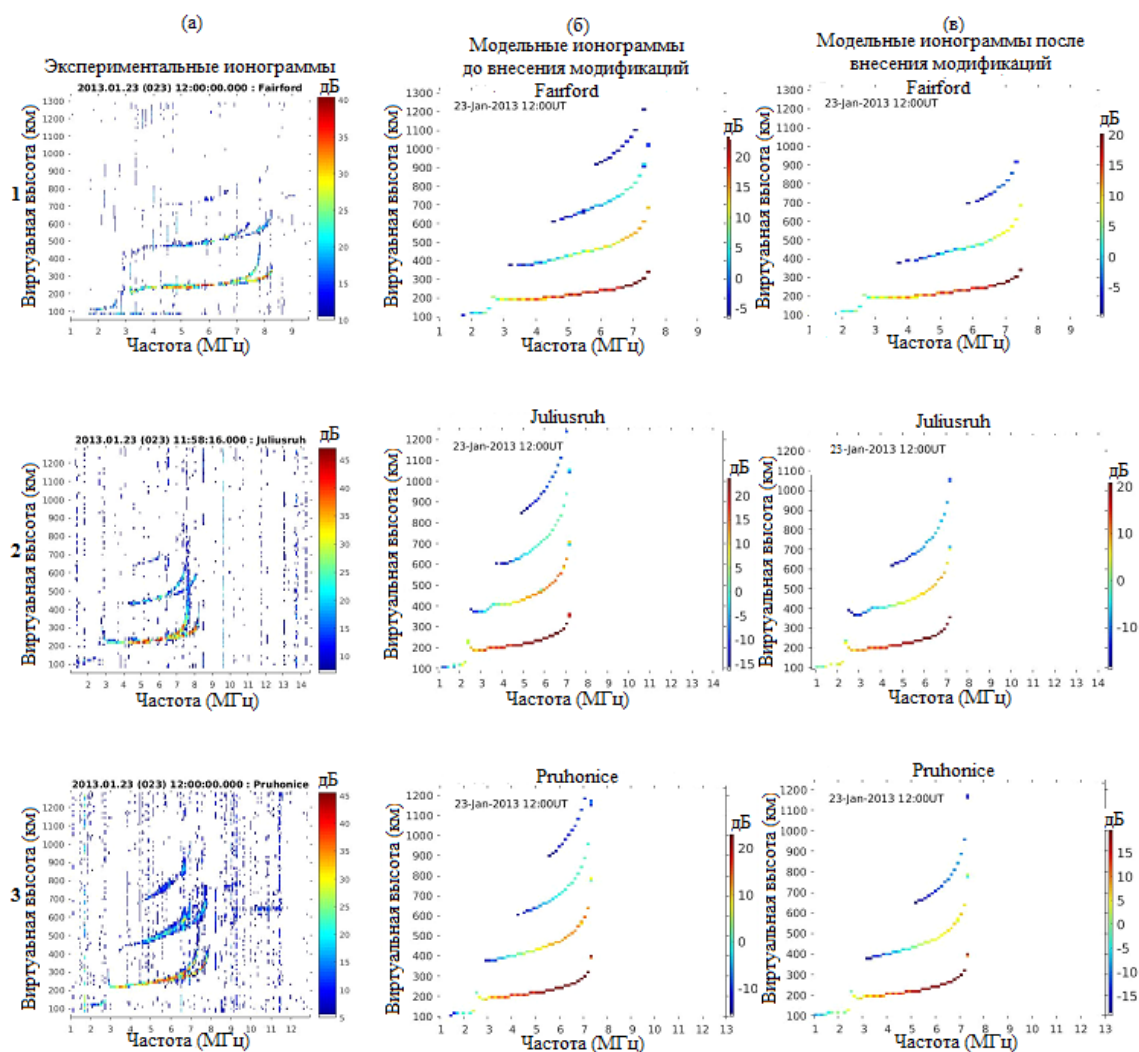


Рис. 9 Частотная зависимость поглощения. Столбец (а) – экспериментальные ионограммы. Столбец (б) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT без модификаций. Столбец (в) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT после внесённых модификаций. Ряд 1 – ионограмма ионозонда Fairford. Ряд 2 – ионограмма ионозонда Juliusruh. Ряд 3 – ионограмма ионозонда Pruhonice. 2013.01.23 12:00 по Гринвичу.

| FF051 2013.01.23 12:00 UT | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | |
| Номер скачка в F слое | 1-ый | 2-ой | 3-ий | 4-ый |
| Экспериментальные значения | 3,00 | 3,00 | 5,90 | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 2,80 | 3,15 | 4,45 | 5,95 |
| Расчётные значения после модификаций | 2,80 | 3,55 | 5,90 | нет |

Таблица 2 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Fairford 2013.01.23 12:00 UT

| JR051 2013.01.23 12:00 UT | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | |
| Номер скачка в F слое | 1-ый | 2-ой | 3-ий | 4-ый |
| Экспериментальные значения | 2,90 | 3,80 | 4,80 | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 2,40 | 2,60 | 3,85 | 4,95 |
| Расчётные значения после модификаций | 2,40 | 2,55 | 4,50 | нет |

Таблица 3 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Juliusruh 2013.01.23 12:00 UT

| PQ052 2013.01.23 12:00 UT | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | |
| Номер скачка в F слое | 1-ый | 2-ой | 3-ий | 4-ый |
| Экспериментальные значения | 2,85 | 3,50 | 4,75 | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 2,50 | 2,90 | 4,20 | 5,75 |
| Расчётные значения после модификаций | 2,50 | 3,15 | 5,05 | нет |

Таблица 4 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Pruhonice 2013.01.23 12:00 UT

Следующий пример сравнения измеренных и расчётных ионограмм 2013.04.07 в 15:00 по Гринвичу представлен на рисунке 10. На измеренной ионограмме Fairford (Рис.10 столбец (а) ряд 1) можно наблюдать три скачка в слое F и 2 скачка в E слое. Второй скачок в E слое едва заметен, однако модифицированная расчётная ионограмма (Рис. 10 столбец (в) ряд 1) позволяет наблюдать его в отличие от расчётной ионограммы до модификации (Рис. 10 столбец (б) ряд 1).

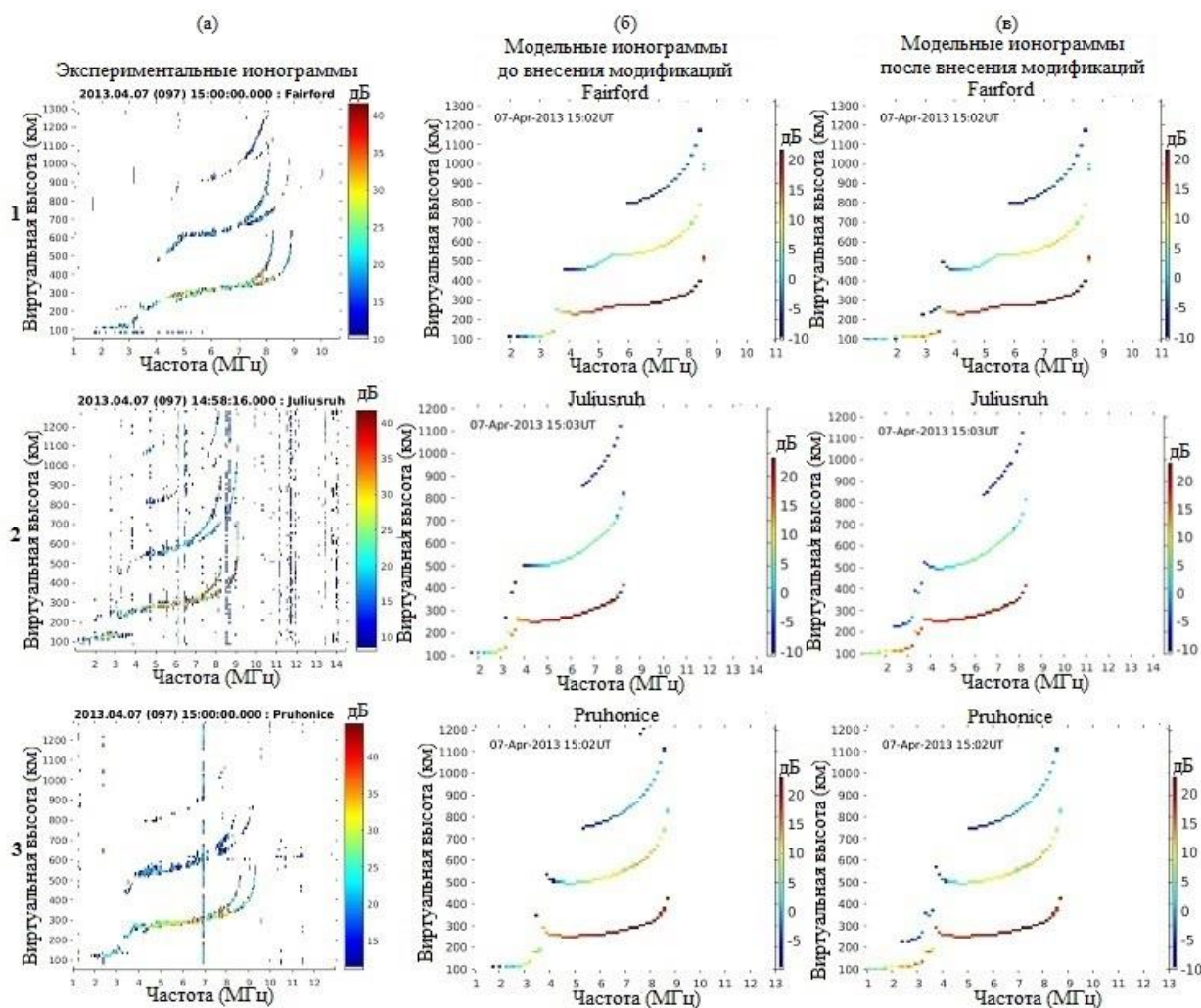


Рис. 10 Частотная зависимость поглощения. Столбец (а) – экспериментальные ионограммы. Столбец (б) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT без модификаций. Столбец (в) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT после внесённых модификаций. Ряд 1 – ионограмма ионозонда Fairford. Ряд 2 – ионограмма ионозонда Juliusruh. Ряд 3 – ионограмма ионозонда Pruhonice. 2013.04.07 15:00 по Гринвичу.

Аналогично на измеренной ионограмме Juliusruh (Рис.10 столбец (а) ряд 2) наблюдается первый сильный и второй слабый скачок в E слое, а также три скачка в слое F. И снова можно увидеть, что в отличие от ионограммы, построенной без модификации (Рис.10 столбец (б) ряд 2), на модифицированной ионограмме (Рис. 10 столбец (в) ряд 2) наблюдается двухскачковое отражение в слое E.

Экспериментальная ионограмма Pruhonice (Рис.10 столбец (а) ряд 3) иллюстрирует хорошо выраженные три скачка в слое F, первый скачок в слое E и очень слабый трек второго скачка в слое E. На расчётной ионограмме без модификаций (Рис. 10 столбец (б) ряд 3) не наблюдается второго скачка в E слое, а на модифицированной расчётной ионограмме (Рис. 10 столбец (в) ряд 3) он наблюдается довольно явно.

В таблицах 5, 6 и 7 также представлены численные результаты минимальных наблюдаемых частот на ионограммах от 2014.04.07 15:00 по Гринвичу. Минимальная наблюдаемая частота первого скачка в слое E не менялась в процессе варьирования параметров, поэтому её в таблице нет.

| FF051 2013.04.07 15:00 UT | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | | |
| Номер скачка в F,E слое | 1-ый (F) | 2-ой (F) | 3-ий (F) | 4-ый (F) | 2-ой (E) |
| Экспериментальные значения | 3,45 | 4,00 | 5,70 | нет | 2,50 |
| Расчётные значения до модификаций | 3,50 | 3,80 | 5,95 | нет | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 3,50 | 3,70 | 5,80 | нет | 2,85 |

Таблица 5 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Fairford 2013.04.07 15:00 UT

| JR051 2013.04.07 15:00 UT | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | | |
| Номер скачка в F,E слое | 1-ый (F) | 2-ой (F) | 3-ий (F) | 4-ый (F) | 2-ой (E) |
| Экспериментальные значения | 3,05 | 3,75 | 4,55 | нет | 2,00 |
| Расчётные значения до модификаций | 3,70 | 3,95 | 6,55 | нет | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 3,70 | 3,75 | 6,30 | нет | 2,10 |

Таблица 6 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Juliusruh 2013.04.07 15:00 UT

| PQ052 2013.04.07 15:00 UT | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | | |
| Номер скачка в F,E слое | 1-ый (F) | 2-ой (F) | 3-ий (F) | 4-ый (F) | 2-ой (E) |
| Экспериментальные значения | 3,30 | 3,45 | 4,60 | нет | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 3,60 | 3,90 | 5,25 | нет | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 3,60 | 3,80 | 5,05 | нет | 2,2 |

Таблица 7 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Juliusruh 2013.04.07 15:00 UT

Дальнейший анализ проведем по ионограммам 2013.06.16 в 12:00 по Гринвичу. Измеренная ионограмма Fairford (Рис.11 столбец (а) ряд 1) иллюстрирует только один скачок в Е слое и один скачок в F слое. Расчётная ионограмма без модификаций (Рис. 11 столбец (б) ряд 1) так же как и модифицированная расчётная ионограмма (Рис. 11 столбец (в) ряд 1) позволяет наблюдать по два скачка в F слое. Однако, на модифицированной расчётной ионограмме (Рис. 11 столбец (в) ряд 1) значение минимальной наблюдаемой частоты второго скачка меньше чем на рассчитанной без модификаций ионограмме (Рис. 11 столбец (б) ряд 1).

На экспериментальной ионограмме Juliusruh (Рис.11 столбец (а) ряд 2) наблюдается 2 скачка в F слое и один скачок в слое Е. На расчётных ионограммах (Рис. 11 столбцы (а) и (б) ряд 2) также можно наблюдать двухскачковое отражение в F слое и односкачковое отражение в слое Е. Однако нетрудно видеть, что модифицированная расчётная ионограмма (Рис. 11 столбец (в) ряд 2) соотносится с практической (Рис.11 столбец (а) ряд 2) лучше, чем расчётная ионограмма без модификаций (Рис.11 столбец (б) ряд 2).

На измеренной ионограмме Pruhonice (Рис. 11 столбец (а) ряд 3) можно наблюдать один скачок в Е слое, один скачок в F слое и слабый второй скачок в слое F. Расчётная ионограмма (Рис. 11 столбец (б) ряд 3) также характеризуется наличием односкачкового отражения в слое Е и двухскачковым отражением в F слое. Но нетрудно видеть, что модифицированная расчётная ионограмма (Рис. 11 столбец (в) ряд 3) точнее характеризует второй скачок в слое F.

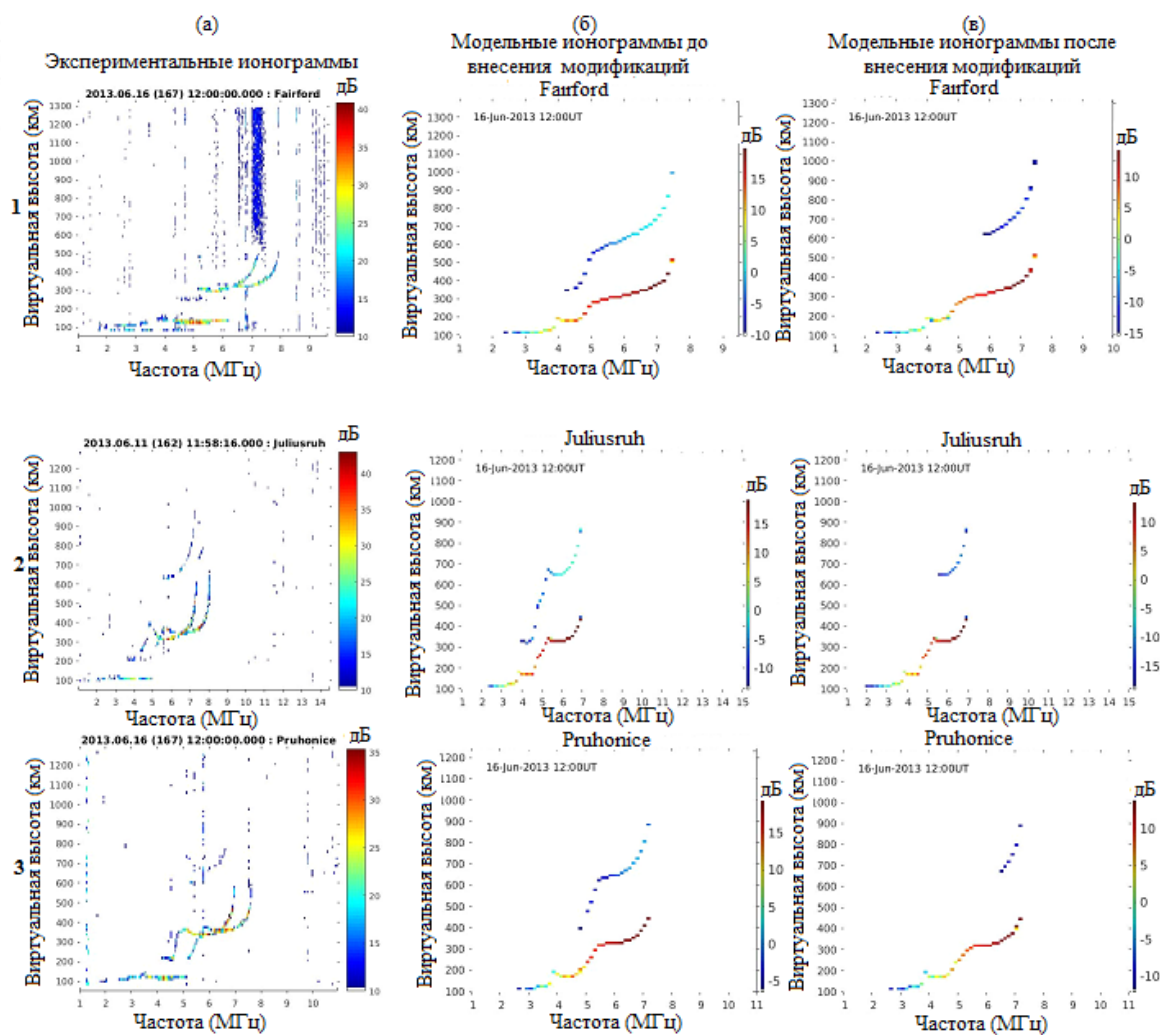


Рис. 11 Частотная зависимость поглощения. Столбец (а) – экспериментальные ионограммы. Столбец (б) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT без модификаций. Столбец (в) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT после внесённых модификаций. Ряд 1 – ионограмма ионозонда Fairford. Ряд 2 – ионограмма ионозонда Juliusruh. Ряд 3 – ионограмма ионозонда Pruhonice. 2013.06.16 12:00 по Гринвичу.

В таблицах 8, 9 и 10 также представлены численные результаты минимальных наблюдаемых частот на ионограммах от 2014.06.16 12:00 по Гринвичу. Минимальная наблюдаемая частота первого скачка в слое Е не менялась в процессе варьирования параметров, поэтому её в таблице нет.

| FF051 2013.06.16 12:00 UT | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | |
| Номер скачка в F слое | 1-ый | 2-ой | 3-ий | 4-ый |
| Экспериментальные значения | 4,00 | нет | нет | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 4,00 | 4,20 | нет | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 4,00 | 5,80 | нет | нет |

Таблица 8 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Fairford 2013.06.16 12:00 UT

| JR051 2013.06.16 12:00 UT | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | |
| Номер скачка в F слое | 1-ый | 2-ой | 3-ий | 4-ый |
| Экспериментальные значения | 3,80 | 5.80 | нет | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 3,85 | 3,95 | нет | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 3,80 | 5,50 | нет | нет |

Таблица 9 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Juliusruh 2013.06.16 12:00 UT

| PQ052 2013.06.16 12:00 UT | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------|------|------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | |
| Номер скачка в F слое | 1-ый | 2-ой | 3-ий | 4-ый |
| Экспериментальные значения | 4,15 | 5.85 | нет | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 3,90 | 4,85 | нет | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 3,90 | 6,40 | нет | нет |

Таблица 10 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Pruhonice 2013.06.16 12:00 UT

Последний рассматриваемый нами момент времени 2013.10.19 09:00 по Гринвичу. Измеренная ионограмма Fairford (Рис. 12 столбец (а) ряд 1) иллюстрирует один скачок в Е

слое, три явных скачка в слое F и слабый четвёртый скачок в F слое. Расчётные ионограммы (Рис. 12 столбец (б) и (в) ряд 1) также позволяют увидеть наличие четырёх скачков в F слое и двух скачков в слое E. Но в модифицированной расчётной ионограмме (Рис.12 столбец (в) ряд 1) четвёртый скачок слабее чем в расчётной ионограмме без модификаций (Рис. 12 столбец (б) ряд 1).

На экспериментальной ионограмме Juliusruh (Рис. 12 столбец (а) ряд 2) видны 5 скачков в слое F и один скачок в E слое. Пакет NIM-RT позволяет рассчитывать 5 скачков, но так как на практике пятискачковое отражение наблюдается нечасто, а время моделирования заметно увеличивается, пятый скачок слоя F не рассматривался. Разница же между расчётной ионограммы построенной без модификации формулы поглощений (Рис. 12 столбец (б) ряд 2) и модифицированной ионограммой (Рис. 12 столбец (в) ряд 2) слабо заметна.

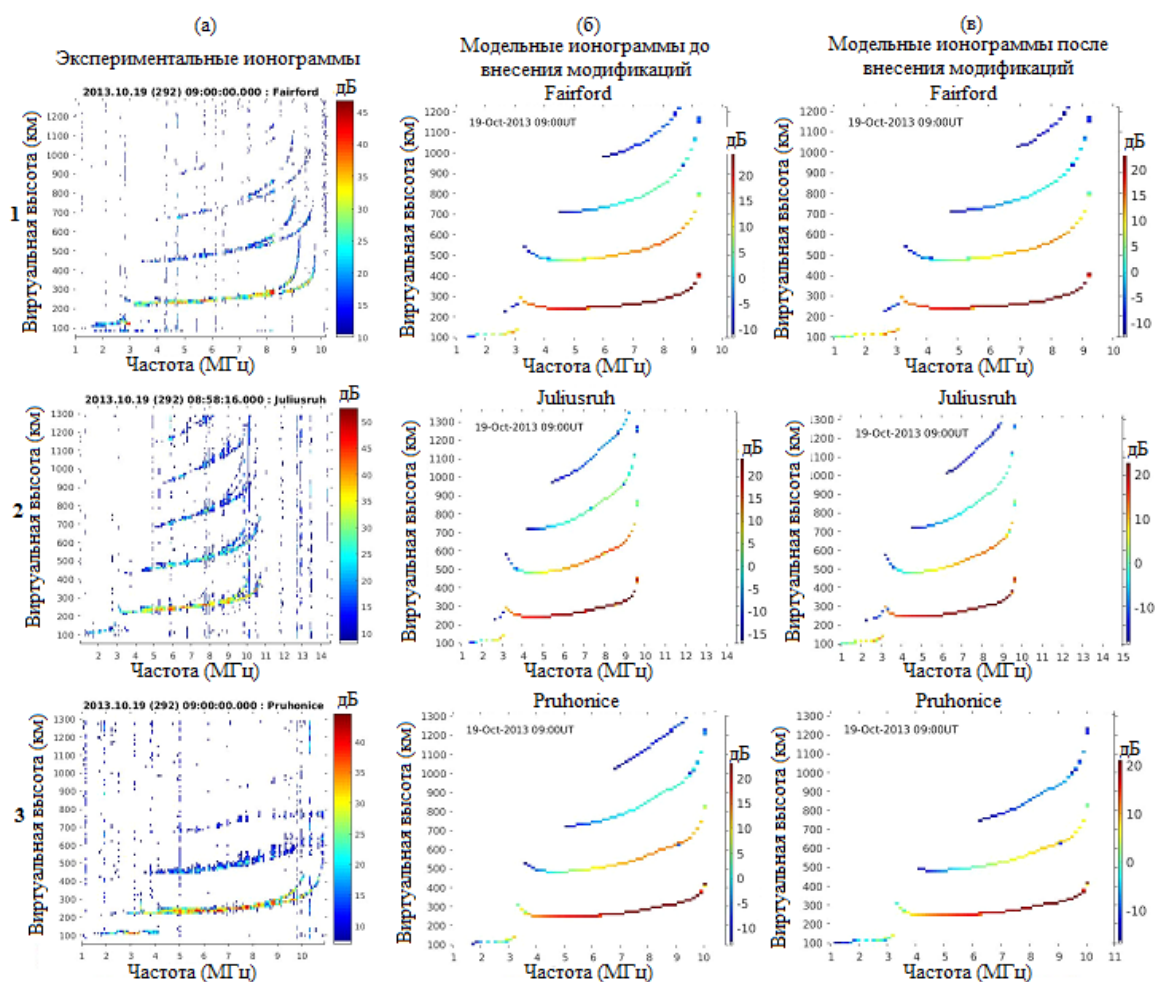


Рис. 12 Частотная зависимость поглощения. Столбец (а) – экспериментальные ионограммы. Столбец (б) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT без модификаций. Столбец (в) – расчётные ионограммы, построенные пакетом NIM-RT после внесённых модификаций. Ряд 1 – ионограмма ионозонда Fairford. Ряд 2 – ионограмма ионозонда Juliusruh. Ряд 3 – ионограмма ионозонда Pruhonice. 2013.10.19 09:00 по Гринвичу.

На экспериментальной ионограмме Pruhonice (Рис. 12 столбец (а) ряд 3) наблюдается двухскачковое отражение от слоя Е и три скачка в F слое. Расчётная немодифицированная ионограмма (Рис. 12 столбец (б) ряд 3) иллюстрирует односкачковое отражение в Е слое и три скачка в F слое. На ионограмме, рассчитанной после модификации (Рис. 12 столбец (а) ряд 3), можно наблюдать 3 скачка в слое F, как и на измеренной (Рис. 12 столбец (а) ряд 3), но, к сожалению, без второго скачка в слое Е.

В таблицах 11, 12 и 13 также представлены численные результаты минимальных наблюдаемых частот на ионограммах от 2014.10.19 09:00 по Гринвичу. Минимальная наблюдаемая частота первого скачка в слое Е не менялась в процессе варьирования параметров, поэтому её в таблице нет.

| FF051 2013.10.19 09:00 UT | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | | |
| Номер скачка в F,E слое | 1-ый (F) | 2-ой (F) | 3-ий (F) | 4-ый (F) | 2-ой (E) |
| Экспериментальные значения | 2,85 | 3,45 | 4,80 | 5,05 | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 3,10 | 3,20 | 4,55 | 5,95 | 2,70 |
| Расчётные значения после модификаций | 3,10 | 3,25 | 4,85 | 6,90 | 2,70 |

Таблица 11 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Fairford 2013.10.19 09:00 UT

| JR051 2013.10.19 09:00 UT | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | | |
| Номер скачка в F,E слое | 1-ый (F) | 2-ой (F) | 3-ий (F) | 4-ый (F) | 2-ой (E) |
| Экспериментальные значения | 3,05 | 3,20 | 5,10 | 5,80 | нет |
| Расчётные значения до модификаций | 3,10 | 3,10 | 4,20 | 5,20 | 2,5 |
| Расчётные значения после модификаций | 3,10 | 3,10 | 4,45 | 6,05 | 2,2 |

Таблица 12 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Juliusruh 2013.10.19 09:00 UT

| PQ052 2013.10.19 09:00 UT | | | | | |
|---|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Минимальная наблюдаемая частота (МГц) | | | | |
| Номер скачка в F,E слое | 1-ый (F) | 2-ой (F) | 3-ий (F) | 4-ый (F) | 2-ой (E) |
| Экспериментальные значения | 3,05 | 4,00 | 5,20 | нет | 2,2 |
| Расчётные значения до модификаций | 3,25 | 3,55 | 5,05 | 6,85 | нет |
| Расчётные значения после модификаций | 3,25 | 4,00 | 6,05 | нет | нет |

Таблица 13 Значения минимальных наблюдаемых частот для экспериментальных и модельных ионограмм станции Pruhonice 2013.10.19 09:00 UT

Заключение

В данной работе была проведена модификация формулы регулярного поглощения коротких радиоволн в средних широтах. Были проведены расчёты регулярного поглощения коротких радиоволн для различных дат в течение 2012 и 2013 года для нескольких станций, а именно Fairford (FF051), Juliusruh (JR051), Pruhonice (PR052).

При попытке варьировать только коэффициент I_0 в первоначальной формуле (12), включённой в пакет NIM-RT, не было получено улучшений результатов. Поэтому в её знаменатель было добавлено слагаемое $\nu = 10$, после чего был варьирован коэффициент I_1 . Полученная формула позволила улучшить точность моделирования регулярного поглощения коротких радиоволн. Её итоговый вид представлен ниже.

$$A_{uv} = \frac{I_1 * (1 + 0.0035 * Ssn) * \cos(\chi)^{0.75}}{(f_{op} \pm f_l)^2 + \nu} (dB)$$

где полученное оптимальное значение $\nu = 10$, а коэффициент I_1 принимает следующие значения. В Январе $I_1 = 430$, в Апреле $I_1 = 250$, в Июне $I_1 = 430$, в Октябре $I_1 = 330$. Были проведены расчёты регулярного поглощения коротких радиоволн для различных дат в течение 2012 и 2013 года для нескольких станций, а именно Fairford (FF051), Juliusruh (JR051), Pruhonice (PR052). Несмотря на то, что в данной работе ионозонды выбирались на приблизительно одной широте, данный метод позволяет так же выбирать станции и на разных широтах для получения зависимости коэффициента I_1 и от координаты.

Применять использованный в работе метод моделирования позволяет наличие обширной сети ионозондов по всему миру. Именно благодаря способности ионозондов правильно регистрировать энергию радиоволны и существует возможность исследования поглощения коротких радиоволн. До появления сети ионозондов и компьютеров достаточной вычислительной мощности получение формул, описывающих поглощение коротких радиоволн, было крайне затруднительным.

В настоящее время разрабатываются программы для автоматического составления формул поглощения коротких радиоволн. Возможно с их появлением, будет предложена ещё более качественная модель поглощения. Однако на данном этапе, полученная модифицированная формула амплитуды регулярного поглощения коротких радиоволн даёт большую точность при моделировании их распространения, чем ранее имеющаяся формула. А значит, поставленная нами цель была достигнута.

Благодарности

Авторы благодарны Центру атмосферных исследований Университета Лоуэлла за данные Digisonde и программу SAO-X для обработки данных и NOAA SWPC за данные GOES.

Список литературы

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972.
2. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971.
3. Pederick L. H., Cervera M. A. Semiempirical Model for Ionospheric Absorption based on the NRLMSISE-00 atmospheric model //Radio Science. – 2014. – Т. 49. – №. 2. – С. 81-93.
4. Ginzburg V. L. The propagation of electromagnetic waves in plasmas //International Series of Monographs in Electromagnetic Waves, Oxford: Pergamon, 1970, 2nd rev. and enl. ed. – 1970.
5. Second C. computer-based interim method for estimating skywave field strength and transmission loss at frequencies between 2 and 30 MHz' //Supplement to CCIR report. – 1978. – С. 252-2.
6. Ferguson B. G., McNamara L. F. Calculation of HF absorption using the International Reference Ionosphere //Journal of atmospheric and terrestrial physics. – 1986. – Т. 48. – №. 1. – С. 41-49.
7. Ю.Р. Прушкин и М.Д. Флигель. Об учёте поглощения в различных методах расчета напряженности поля. // Исследование распространения коротких радиоволн – М.: Наука, 1973
8. Davies, K., 1965. Ionospheric Radio Propagation. United States Department of Commerce, National Bureau of Standards Monograph 80.
9. Ionospheric Radio Propagation. NBS, Circular 462. Washington, 1949
10. Zaalov, N. Y., E. M. Warrington and A. J. Stocker, A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths, *Radio Science*, 40, RS4006, 2005.
11. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Границы применимости метода геометрической оптики и смежные вопросы //Успехи физических наук. – 1980.
12. Sauer, H.H., Wilkinson, D.C., 2008. Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons. *Space Weather* 6, S12002
13. A Versatile three-dimensional ray tracing computer program for radiowaves in the ionosphere R. Michael Jones, Judith J. Stephenson, 1975